

秋山俊雄(ローチェスター大学内科心臓学 名誉教授)

1. はじめに

前3回の講義では、心筋虚血や梗塞にともなう心電図波形の変化は電気物理学的な現象であり、立体 角理論により説明できることを示した^{1)~3}.今回は、複数の隣接する胸部誘導心電図にST-T波形異常 やQRS波形異常が記録されたとき、心筋虚血・梗塞の位置や大きさをどのように推定できるか考えて みたい.



図1 57歳男性より記録した持続する胸痛の発症1時間後の12誘導心電図 胸部誘導V₁~V₃からV₄~V₆に移行するときの波形の歪みは、体動によるアーティファクトである. (心電図記録は1mV/10mm, 1 sec/25 mm)

[●] Keywords;立体角理論,心虚血,心筋梗塞,ST-T波,Q波

図1は、長期喫煙歴を有す57歳男性より記録された持続する胸痛の発症1時間後の12誘導心電図である. I、 aV_L , $V_2 \sim V_6$ には、すでに小さなQ波が出現しており、QRS幅は0.11秒に延長している. V_2 , V_3 では巨大 R波が認められ、 $V_1 \sim V_5$ ではST上昇と高電位 T波が記録されている. この後、 $V_2 \sim V_4$ ではQ波の深さと幅が増し、血中トロポニンも上昇したため、急性ST上昇型前壁心筋梗塞(Q波前壁梗塞) と診断された.この心電図を一見すると、梗塞部位の右側の境界は V_1 誘導の直下にあり、左側の境界 は V_5 誘導の直下にあるように判断されるが、その判断は正しいといえるのか.

救急外来や CCU でしばしば遭遇するこうした問題には、立体角理論を応用した考察が有用である.

2. 立体角理論

立体角理論では心電図波形の電位(V)を下記の式で表すことができる^{1)~3)}.

 $V = K \Phi \Omega$

この式は、心臓内に電気的な境界面が存在し、その面に垂直な方向に起電力(electromotive force)が発生しているとき、境界面から離れた観測点Pにおける電位が、以下の3要素で表されることを意味している.

- ①Φ(ファイ)は起電力強度を表し、境界面で発生する電位差または電流密度に相当する. Φの極性は、観測点 Pから眺めて、境界面で発生する電流が Pに向かう方向に流れるときは陽性であり、逆に遠ざかる方向に流れるときは陰性となる.
- ②Ω(オメガ)は立体角であり、観測点Pを中心とする半径1の球体の表面に投影される境界面の表面 積に相当する.立体角の単位は3次元モデルではステラジアンであり、最大値は半径1の球体の表 面積(4π)となる.2次元モデルが使用されるときの単位はラジアンであり、最大値は半径1の円 周(2π)となる.
- ③ Kは導体の伝導率によって決まる定数で、心筋細胞内外の抵抗や心臓周辺の組織の抵抗を含む複 雑な要素である.

3. 心外膜面上で観察される貫壁性心筋虚血領域

図2は、球形の左室に貫壁性虚血が存在するとき、心外膜面上の観測点を虚血部中心の直上から周辺の非虚血部へと移すと、虚血境界面が観測点に対して張る立体角がどのように変わるかを示している. グラフの横軸は観測点の位置を表し、縦軸がΦのプラス・マイナスを加味した立体角の総和(単極誘導 波形のST変位の大きさに相当する)である.心電図学的な虚血境界面(ST上昇領域)は、虚血の大小に かかわらずモデルに設定した虚血境界面の約2mm外側に位置しており、極めて近接している⁴.



貫壁性心筋虚血モデルにおける心外膜面上の立体角分布 左室は半径3cmの球形,心室壁の厚さは1cmとした. 図の 下部の斑点状領域は,大きさの異なる2種類の虚血(小さい虚 血は半径0.75cm,大きな虚血は半径1.75cmの円形)を表す. 虚血領域の両端から上方に向かう破線は虚血境界面の位置を示 す.グラフの横軸は心外膜面上の観測点の位置(虚血領域の中 心からの距離),縦軸は虚血境界面が観測点(心外膜面上)に対 して張る立体角を示す. +の立体角はST上昇をもたらし, -の立体角はST下降をもたらす. 〔文献4)より引用改変〕



図3

】 貫壁性虚血を作成したブタの心臓の心外膜面 から記録したST電位と、虚血境界面の立体角 先端を生理食塩水に浸した綿球で包んだ単極電 極を心外膜面上に置き、それを非虚血領域(左 端)から虚血領域(ISCHMIC ZONE)を通過さ せ、対側の非虚血領域(右端)まで移した後、 27ヵ所で心電図を記録してST電位の分布を測 定した(○). さらに、虚血境界面がそれらの心 電図を記録した各部位に対して張る立体角を測 定して表示した(●). グラフの横軸は心外膜面 上の距離(cm)、縦軸はST電位(mV)と立体角 (ステラジアン)を示す. 図中央の陰影を付けた 部位では、幅広い QRSが記録された. データ は文献4)の実験[電図講義Ⅱの図4~8で紹介 2)]から得られたものである.

立体角理論によるこのような予測は正しいのであろうか? 図3は, ブタの心室に貫壁性虚血を作成 し, その心外膜面上に置いた単極電極(先端は生理食塩水に浸した綿球で包まれている)の位置を, 非虚 血領域から虚血領域を通過して, 対側の非虚血領域まで移動させたときの, ST電位(27ヵ所で記録)と 虚血境界面がそれぞれの記録部位に対して張る立体角の関係を表す. 図3上部の太い実線(水平)は, 肉眼で識別可能な心外膜面上の虚血範囲である. この実験結果より、心外膜面上で記録される ST 電位は、その記録部位からみた虚血境界面の立体角 と密接に関連しており、電位変化から虚血領域をほぼ正確に判定できることが明らかとなった⁴⁾.

4. 胸壁上の ST-T 波形分布から貫壁性心筋虚血領域を推定できるか

上述のように、立体角理論を応用すると、心外膜面上の単極誘導電位波形から、ほぼ正確に貫壁性心筋虚血の境界面の位置を推定できることが判明した.それでは、胸壁上で記録された心電図のST-T波形から、貫壁性虚血領域を推定することは可能であろうか? この疑問に答えるために、形状の異なる二つの貫壁性虚血のモデルを用いて検討した(図4~6).

はじめに用いたモデル(図 4)では、両側の虚血境界面は、左室中心点 Cと虚血領域中心を結ぶ直線に 並行に設定されており、境界面と点 Cが作る角度(2 θ)は 108°である。観測点(P)は、左図では胸壁上 0°に位置しており、虚血境界面が Pに対して張る立体角は Ω R、 Ω Lで表示した。虚血境界面を横切る 矢印は ST部分で流れる電流の向きを示す。この電流は Pに向かう方向に流れるため、起電力は陽性で あり、K Φ Ω の積も陽性となり ST部分は上昇する。右図のグラフ縦軸は Φ のプラス・マイナスを加味 した立体角の総和である。0よりも上方(+)の立体角は ST上昇をもたらし、下方(-)の立体角は ST下 降をもたらす。

胸壁上の観測点 Pが左側に移動するにつれて、立体角の総和は急激に減少し、胸壁上 41°の位置で0 となる. 観測点 Pが 41°を越えてさらに左方に移動すると立体角の総和はマイナスとなり、ST上昇に 代わって ST下降が出現する.

このモデルでは、左側の虚血境界面は胸壁上で 14°の位置にあり、高電位の ST 上昇が予測される. 胸壁誘導心電図の波形が ST 上昇から ST 下降に移る位置を心電図学的な虚血境界と定義すると、それ は胸壁上 41°の位置であり、14°の位置よりもはるかに外側に位置することに注目していただきたい.

急性貫壁性前壁心筋梗塞患者の胸部誘導で記録される ST上昇の最大値は,筆者の経験では約1mV である.図4右のグラフでは,前胸壁0°の立体角(8.3°)が最大値であるが,それが1mVの ST上昇を もたらすと仮定すると,臨床的に有意義とされる0.1mV以上の ST上昇は,立体角0.8°(8.3/10)以上の 位置で生ずることになり,胸壁上は38°までの位置となる.左側の虚血境界面直上の胸壁点(14°)と38° の差(24°)は,隣接する二つの胸部誘導点の間の角度よりも大きいのであろうか?胸部誘導V1とV2の 中間点が胸壁上の0°に位置し,V6が胸壁上の90°に位置するのであれば,隣接する二つの胸部誘導の 間の角度は20°(90°/4.5)となる.したがって,図4のモデルでは,貫壁性心筋虚血の左側の境界面の直 上の誘導よりもひとつ外側の誘導で,依然として臨床的に有意義な0.1mV以上の ST上昇が記録され ることが予測できる.



図 4 貫壁性虚血によって生ずる前胸 壁上の ST 電位分布: 立体角理論 を用いたモデル解析 左室腔の半径は2cm. 左室壁の厚さは 1 cm. 心外膜面から前胸壁までの距離 は5 cm であり, 虚血領域の広がり(2 θ) は108°に設定した.このモデルでは両 側の虚血境界面が左室中心点Cと虚血 領域中心を結ぶ線と並行となるように 設定した. 虚血境界面を延長した線が 胸壁と交叉する位置は14°である。観 測点 Pが胸壁上 0°の位置にあるとき. 左右の虚血境界面が張る立体角をΩL とΩRで表示した。右のグラフは観測 点の位置を胸壁上0°から左に移動した ときの立体角の変化を表す.〔文献 4)~ 6)〕で使用されたモデルと同じ〕

図4右のグラフからは、胸壁上73°の位置で深いST下降が起こることも予測される(胸壁0°で1mVのST上昇が起こると仮定すると、この部位では0.8mVのST下降となる).例えばST上昇型急性前壁心筋梗塞患者のV₃誘導で0.8mVのST上昇、V₄で0.4mVのST上昇が記録され、V₅ではST変化なし、V₆で0.4mVのST下降が記録された場合、一般的には急性ST上昇型心筋梗塞に急性ST下降型心筋梗塞が併発していると解釈されることが多い.しかし、立体角理論(図4右のグラフ)からは、貫壁性心筋梗塞でST上昇が記録される胸部誘導に隣接する部位でST下降が記録されることは十分予測可能であり、必ずしもST下降型心筋梗塞の併発を考える必要はないことになる.

これまでは、両側の虚血境界面を、左室中心点Cと虚血領域中心を結ぶ直線に並行になるような形状のモデルを用いて解析を行った、次に、貫壁性虚血の境界面が左室壁と垂直になる形状のモデルを設定し検討した(図5). 虚血領域の広がり(2θ)は60°とした. この図には、胸壁上の観測点の位置を0°から80°まで移動させたときの立体角(総和)が表示してある(2次元および3次元の立体角). 水平の破線は立体角0のレベルを示す(このレベルよりも上方ではST上昇、下方ではST下降が起こると考えられる). 右上図には虚血境界面の位置の目印として、B1、B2、B3の3点を表示した. B1は、虚血境界面の中間点から真上に延ばした直線(左室中心点Cと虚血領域中心を結ぶ直線と並行)が胸壁と交叉する点であり、B2は虚血境界面の小外膜面から真上に延ばした直線が胸壁と交叉する点である. B3は虚血境界面(左室壁に垂直)を外挿した直線が胸壁と交叉する点である.

3次元,2次元いずれのモデルでも、立体角が0となる(ST電位も0となる)胸壁上の位置はほぼ同じ(約60°)であり、B2(11°)よりもはるかに外側となる。その差分(41°)は隣接する二つの胸部誘導間の角度(20°)の2倍以上であることに留意していただきたい。図5の3次元モデルでは、胸壁上0°の位置で虚血境界面の立体角が最大0.23ステラジアンとなる。ここで1mVのST上昇が生ずると仮定すると、胸壁上48°の位置(B2よりも37°外側)までは0.1mV以上のST上昇が生ずることになる。



図 5 貫壁性虚血によって生ずる前胸壁上の ST 電位分布:立体角理論を用いたモデル解析 このモデルでは両側の虚血境界面を左室壁と垂 直になるように設定した. 虚血領域の広がり(2θ) は 60°とした. グラフの横軸は胸壁上の観測点 の位置を示す.縦軸は虚血境界面が胸壁上の各 観測点に対して張る立体角を二次元モデルの値 (○左目盛)と三次元モデルの値(●右目盛)で表 示した. B1, B2, B3は虚血境界面の前胸壁上の 目印である。B1は、虚血境界面の中間点から 真上に延ばした直線(左室中心点Cと虚血領域 中心を結ぶ線と並行)が胸壁と交叉する点であ り、B2は虚血境界面の心外膜面から真上に延 ばした直線が胸壁と交叉する点である。B3は 虚血境界面を外挿した直線が胸壁と交叉する点 である.

図5のグラフは筆者の計算に基づいているが,Hollandらも,これと類似したモデル解析の結果を発 表している〔参照:文献6〕の図4〕.彼らは貫壁性虚血の境界面直上の前胸壁では,依然として明らかな ST上昇が記録され,観測点をそこから外側へ大幅に移動するとST電位は0となり,さらに外側に移動 するとST下降が記録されることを予測している.

図6は、貫壁性虚血の境界面が左室壁と垂直になる形状のモデルで、虚血領域の広がり(2 θ)を30° から100°まで変化させ、その影響を検討した(2次元モデル).図5と同様、虚血境界面の前胸壁上の目 印としてB1,B2,B3の3点を表示した、虚血境界面が胸壁上の観測点に対して張る立体角の総和が0 となる(ST電位が0mVとなる)胸壁上の位置(下部の水平破線との交点)は、虚血領域の広がりがいず れの場合でもB1,B2,B3の外側に存在する、次に、ST上昇0.1mVが記録される胸壁上の位置を推定 してみよう、この場合、虚血領域の広がり(2 θ)が100°のときの立体角の最大値(15°)が1mVのST上 昇をもたらすと仮定すると、0.1mVのST上昇をもたらす立体角は1.5°となる、グラフで1.5°のレベル に水平破線を引いて立体角曲線との交点を求めると、胸壁上の位置は2 θ が100°,60°,40°,30°のとき、 各々62°,51°,46°,43°となる。これらの位置は、B2の位置から各々46°,41°,40°,38°外側に寄っ ている(隣接する二つの胸部誘導間の角度の約2倍).

図6のモデル解析からは、貫壁性虚血領域が広がるにつれて、0.1 mV以上のST上昇を示す前胸壁の 範囲も広がることと、虚血中心部の直上の胸壁でのST上昇値が増大することが予測される.これは、 心筋梗塞急性期に、胸壁誘導のSTマッピングでNST(0.1 mV以上のST上昇が記録される誘導の数) やSTmax(ST上昇の最大値)から貫壁性心筋虚血の大きさを評価する臨床手法の理論的根拠となる.



図 6

貫壁性虚血によって生ずる前胸壁上の ST電位分布:立体角理論を用いたモデ ル解析

このモデルでは両側の虚血境界面を左室壁と 垂直になるように設定し、虚血領域の広がり (2*θ*)を30°,40°,60°,100°と変化させた. グラフの横軸は胸壁上の観測点の位置を示 し、縦軸は虚血境界面が観測点に対して張る 立体角(二次元モデルの値:ST電位を反映す る)を示す.グラフ下部の水平破線はST電 位が0mV (Zero ST)あるいは0.1mVと想 定される立体角を表す.

図1の心電図の急性心筋梗塞が、図4や図5のモデルに示すような形状の貫壁性虚血であると仮定すると、立体角理論からは、虚血境界面は0.1 mVのST上昇が記録された V_1 , V_5 の直下ではなく、 V_2 , V_4 の直下あるいは、それよりも内側に位置することが想定される.

5. 胸壁上の ST-T 波形分布から ST 下降型心筋虚血領域を推定できるか

図7は、56歳女性患者より記録された持続する胸痛発症 30分後の12誘導心電図である(長年の喫煙 歴を有し,転移を伴う肺癌と診断された翌日).幅広いP波(0.12秒)と幅広いQRS波(0.13秒)に加えて、 $V_1 \sim V_5$ 誘導で明らかなST下降と2相性T波が記録されている.これらの心電図異常は数時間後にも 認められ、血中トロポニン値が異常に上昇したことから、ST下降型急性前壁梗塞と診断された.この 症例は、超急性期においてさえ、ST下降と2相性T波を示すのみで、巨大R波(giant R wave)が出現 しないことから、心内膜下に限局した心筋梗塞であると考えられる[参照:心電図講義 II の p.321 ~ 322²⁾、心電図講義 II の p.416 ~ 418³⁾ こさらに、この心電図では $V_2 \sim V_4$ でST下降が最も顕著となっ ており(0.3 mV)、その両端の V_1 、 V_5 では軽度であった(0.1 mV).この症例の心筋虚血部外縁は V_1 と V_5 の直下に位置しているのであろうか?

図8は、73歳女性患者より記録された持続する胸痛発症40分後の12誘導心電図である(長年の喫煙 歴を有す). 胸部誘導に深いST下降と陰性T波が認められ、CPK値が異常に上昇したことから、ST下 降型急性心筋梗塞と診断された. この患者でも、図7に示した症例と同様、超急性期の心電図に巨大R 波が出現していないことから、梗塞領域は心内膜下に限局すると考えられる〔参照:心電図講義Ⅱ・Ⅲ^{2),3}〕.



図7 心筋梗塞の超急性期に記録された著明な ST 下降

患者は56歳の女性(40年以上の喫煙歴を有す),転移を伴う肺癌と診断された翌日に持続する胸痛 が起こり、30分後に心電図を記録した. $V_1 \sim V_5$ に明らかなST下降があり(前日には認められな かった)、血中トロポニン値が上昇した.冠動脈造影で左回旋枝の完全閉塞を確認し、冠血管拡張 術が施行された.(心電図記録は1mV/10mm,1 sec/25 mm)



図8 心筋梗塞の超急性期にST下降とST上昇が隣接する胸部誘導に記録された症例 患者は73歳の女性(50年以上の喫煙歴を有す)であり、持続する胸痛発症40分後に記録された心電図 の $V_1 \sim V_4$ 誘導でST下降と陰性T波、その外側の V_5 、 V_6 誘導でST上昇が認められた、CPK値の 上昇もあり、急性心筋梗塞と診断された.(心電図記録は1mV/10mm, 1 sec/25 mm)



図 9 心内膜下虚血の厚さと、虚血領域真上の 前胸壁での ST 電位の関係 この模式図に描かれている2種類の心内膜下虚 血は虚血領域の広がり(心内膜面上)は同じであ るが $(2\theta = 90^{\circ})$,厚みが異なる(左図は薄く, 右図は厚い). 虚血境界面が前胸壁の観測点 P に対して張る立体角は、P点の周りに描かれた 半径1の球の斑点状領域に相当する(左右で同 じ). ST部分では、境界面の電流はP点から遠 ざかる方向に流れるため(矢印)起電力は陰性で あり、ST下降が生ずる、モデルの左室腔半径 は2 cm. 左室壁の厚さは1 cm. 心外膜面から

図8の症例では、顕著なST下降と陰性T波が記録された $V_1 \sim V_4$ 誘導の左外側にある V_5 , V_6 誘導に、 ST上昇が記録されている、この所見は、急性前壁心内膜下梗塞の左側に隣接して、ST上昇型急性心筋 梗塞が発生していることを意味するのであろうか?

それらの疑問を念頭におきながら、小内膜下虚血では前胸壁上の ST 電位分布にどのような影響が現 れるかを、立体角理論を応用して考察を進める(図9~11).

まず、厚さの異なる心内膜下虚血の虚血境界面が、前胸壁上の観測点に対して張る立体角について考 えてみよう. 図9に、心内膜面上の広がり(左室中心点Cにつくる角度2 θ)は同じであるが、虚血領域 が薄い場合(左図)と厚い場合(右図)を模式的に示す。この両者で、虚血境界面が前胸壁上の観測点Pに 対して張る立体角(P点を中心とする半径1の球の斑点状領域)は同一であるため、ST下降の電位も同 一と予測される. ただし、厚さの異なる心内膜下虚血で、虚血心筋の伝導遅延や伝導ブロックあるいは 活動電位振幅低下の程度が異なる場合は、QRS波形に違いが表れる可能性がある〔参照:心電図講義Ⅲ³ の図8.12〕.

次に、心内膜面上の虚血領域の広がりと立体角の関係について考えてみたい、図 10A は心内膜面上 の虚血領域が2 θ = 152°にまで広がった状態を示す.ここで胸壁上の観測点 Pから虚血境界面の両端に 線を引くと、心内膜面を表す円に対する接線となる(接点 T)、この状態では、虚血境界面が P 点に対し て張る立体角(P点の周りに描かれた半径1の球の斑点状部分)は最大となり、境界面で生ずる電流はす べて P 点から遠ざかる方向に流れるため、最大の ST 下降が起こることが予測される〔参照:心電図講 義Ⅱ²⁾の図9.12〕.



図 10A 心内膜下虚血領域の広がりと、その真上の 前胸壁から眺める虚血境界面立体角 図 9と同じモデルを用いて、虚血領域の広がり(2θ)を 152°に設定した.前胸壁の観測点Pと虚血領域の両端を 結ぶ直線は、左室心内膜面を表す円に対する接線となる (接点 T).この状態で、虚血境界面がP点に対して張る 立体角(P点の周りに描かれた半径1の球の斑点状領域) は最大となる.



図 10B 心内膜下虚血領域の広がりが非常に大きくなっ たときの立体角

図 10Aと同じモデルを用いて、虚血領域の広がり(2θ)を240° に設定した.前胸壁上の観測点Pから、虚血境界面へ接線(接 点 T2)を引くとともに、心内膜面虚血領域の両端(E)へ直線を 引くと、虚血境界面は5つの部分(1~5)にわかれる.虚血境 界面の最外側から真上に(P点と左室中心点Cを結ぶ直線に並 行に)直線を引くと、前胸壁と15°の位置で交叉する.

図 10Bは、心内膜面の虚血領域が、接点 Tを越えて、2 θ = 240°まで広がった状態を示す。観測点 Pから、虚血境界面へ接線(接点 T2)を引くとともに、心内膜面虚血領域の両端(E)へ直線を引くと、虚 血境界面は5つの部分に分かれる。部分1と部分2がP点に対して張る立体角は、大きさは同じである が、部分1では境界面の電流がPに向かう方向に流れるのに対し、部分2ではPから遠ざかる方向に流 れる。このため、それらの効果は相互に相殺され電位変化を生じない(internal cancellation)。同様に 部分4と部分5の起電力も相殺される。結局、部分3の起電力のみが残り、その立体角はP点の周りの 半径1の球の斑点状部分に相当する。この立体角は、図 10Aに示す2 θ が 152°のときの立体角よりも 小さいことに注目していただきたい。したがって、心内膜面虚血の領域が広がり、2 θ が 152°よりも大 きくなった場合は、胸壁上の観測点における ST 下降の程度が減少することが予測される。

図 10Cのグラフは、心内膜下虚血の広がり(2 θ)を0°から360°まで変化させたとき、虚血境界面が 胸壁上の観測点Pに対して張る立体角を示す(3次元モデル). 立体角は、心内膜面上の虚血領域の広が り(2 θ)が、152°(P点から虚血領域の両端に引いた直線が心内膜面への接線となる角度)に達するまで は急激に増大するが、2 θ が152°を越えると internal cancellation が始まり、立体角は急激に減少する.



図 10C

心内膜下虚血領域の広がりと、虚血境界面 が胸壁上の観測点に対して張る立体角の 関係 図10A、Bに示すモデルを用いて、虚血領域の

広がり(2θ)を0~360°の範囲で変化させ(横 軸), P点の立体角(縦軸)を求めた. 立体角は ST電位と考えてよいが, (-)をつけて負の起 電力であることを表示した. Tは, 観測点 Pと 虚血境界面の両端を結ぶ線が心内膜面への接線 となる状態(図 10A)を示す.

そして 2 θ が 360°に達すると立体角は 0 となる. このグラフで示す立体角の大きさは、 P点における ST下降の程度を表すと考えてよい. したがって、ST下降は 2 θ が 152°になるまでは急激に深くなるが、 心内膜下虚血の領域が、それ以上に拡大すると浅くなりはじめ、 2 θ が 360°に達すると ST下降は消失 することが予測される. 2 θ が 360°に達する状況では、完全に閉じられた球形の電気的境界面を、その 外側に位置する観測点から眺めることになる [参照:心電図講義 III³⁾の図 10で解説].

このように、心内膜下虚血の領域が広くなると、前胸壁のST下降は、はじめは深くなるが、領域がある程度以上拡大するとむしろ浅くなる。この現象は、これまでに検討した貫壁性心筋虚血の領域と前胸壁のST上昇の関係[参照:心電図講義II²⁾の図1]や、陳旧性心筋梗塞の大きさと前胸壁のQ波の深 さの関係[参照:心電図講義II³⁾の図13]と類似性があるようにみえる。しかし、そのメカニズムは異 なっている。心内膜下虚血の場合は、上述のように起電力のinternal cancellationに基づく現象であ る.貫壁性心筋虚血の場合は、虚血境界面が観測点から遠ざかるためであり、陳旧性心筋梗塞の場合 は、梗塞巣が作る起電力欠損部分(Wilsonの窓)の境界面(窓枠にあたる部分)が観測点から遠ざかるた めである。

筆者がローチェスター大学病院 CCUで経験した多くの ST 下降型急性心筋梗塞患者のなかには, 胸 壁誘導の ST 下降の程度が比較的浅いにもかかわらず, 心原性ショックを起こして死亡した症例があっ た. それらの患者の剖検では, 左室のほぼ全周にわたる心内膜下虚血が確認された. これは, 心内膜下 虚血が非常に広範囲に及ぶと, 胸壁誘導の ST 下降が軽減するという立体角理論の予測を支持する所見 と考えられる.

それでは、心内膜下虚血領域の広がり(2θ)は、前胸壁上のST電位分布にどのような影響を与える のであろうか.図11は、2次元モデルで2θを30°、60°、152°、240°と変えたときに、虚血境界面が 前胸壁上の各観測点(位置を図4~6と同様に角度で表示:グラフの横軸)に張る立体角(起電力のプラス・ マイナスを加味した総和:グラフの縦軸)を表す(2次元モデルを使用).前胸壁上0°(虚血中心の直上)





の立体角をみると、2 θ が 30°のときは 10°, 2 θ が 60°のときは 18°, 2 θ が 152°のときは 29°, 2 θ が 240°のときは 22°である。この状態では、虚血境界面の電流は全体として観測点から遠ざかる方向に流 れるため、起電力(Φ)は陰性であり、K Φ Ω も陰性となって ST下降が生ずる。

図 11 のグラフで、2*θ* を 30° から 60°, 152°, 240°と拡大していくと、立体角が 0となる胸壁上の位置(水平破線との交点)は、75° から 80°, 85°, 90°と左方に移動することがわかる. したがって、心内 膜下虚血領域の範囲が拡大するにつれて、ST下降が記録される胸部誘導の数が増えることが予測される.

ここで、心内膜下虚血領域の外縁の位置について考えてみたい.図 10Bに示すように、2*θ* =240°と 非常に広範囲の心内膜下虚血でも、虚血領域外縁の真上の前胸壁点は約 15°に位置している.一方、 図 11で立体角が 0となる胸壁上の位置を「心電図学的な前胸壁上の虚血境界」と定義すると、それらは 実際の虚血領域外縁の真上の前胸壁点よりもはるかに外側に位置している.したがって、心内膜下虚血 では、その大きさや虚血境界の位置を前胸壁誘導心電図の ST 波形分布から推定することは困難である と筆者は考えている.

6. 胸壁上のQ波分布から陳旧性貫壁心筋梗塞の大きさと位置を推定できるか

陳旧性 Q波心筋梗塞の患者では、前胸壁で記録された心電図の Q波分布から、梗塞の大きさと境界 の位置を推定できるであろうか? 図 12A に示す 2次元モデルを用いて、この問題を考えてみたい. こ のモデルでは、陳旧性貫壁性心筋梗塞の境界面が左室壁に垂直に位置しており、梗塞巣の広がり(2θ) を 60°と設定した. 観測点 Pは、梗塞巣中心の真上に置かれており、梗塞境界面の胸壁上の目印として B1, B2, B3が描かれている. 梗塞境界面が観測点 Pに対して張る立体角は、このモデルでは、脱分極波 が心内膜面より心外膜面に進むにつれて、わずかではあるが徐々に大きくなる. 図 12B は、この脱分 極波が左室壁の中間点に達した時点の立体角が、観測点 Pを前胸壁 0°の位置から左側に移動すると、 どのように変化するかを表している. 梗塞巣の広がり (2θ)は、30°, 40°, 60° および 100° に設定した. 図 12A に示す梗塞境界部の前胸壁上の目印(B1, B2, B3)のうち、臨床医が心電図を読むうえで B2(心 外膜面上の境界)が重要と仮定する. 2θが 60° のとき B2 は前胸壁上 11° に位置しており、立体角が 0と なる (Q波が消失する)前胸壁上 74° のはるかに内側である. 同様に、2θが 30°, 40°, 100° のときも、各々 の B2 の位置と梗塞 Q波が消失する誘導の位置(心電図学的な梗塞境界)の間には大きな隔たりがある.

図12Bのグラフで,前胸壁上0°の位置の立体角に注目すると,この範囲内では,梗塞巣の広がり(2 θ) が大きくなるほど立体角も大きくなる(Q波が深くなることを意味している)ことが明瞭である[参照: 心電図講義 II の図1と合致する²⁾]. 臨床的には,梗塞 Q波の最大値は1mV程度であるとみなし, 図12Bで2 θ =100°のときの前胸壁 0°の位置の立体角(34°)が1mVの梗塞 Q波をもたらすと仮定する と,0.1mVの梗塞 Q波をもたらす立体角は 3.4°となる(グラフの水平破線). この立体角をもたらす胸



図 12A

陳旧性貫壁性心筋梗塞の境界面が胸壁上の観測点に 対して張る立体角

このモデルでは、心筋梗塞の境界面が左室壁に垂直であり、 梗塞巣の広がり(2θ)を60°に設定した。左室腔半径は 2 cm,左室壁の厚さ1 cm,心外膜面から前胸壁 P 点までの 距離5 cmである。B1,B2,B3は梗塞境界面の前胸壁上の 目印である。B1は、梗塞境界面の中間点から真上に延ばし た直線(左室中心点 C と梗塞巣中心を結ぶ線と並行)が胸壁 と交叉する点であり、B2は梗塞境界面の心外膜面から真上 に延ばした直線が胸壁と交叉する点である。B3は梗塞境界 面を外挿した直線が胸壁と交叉する点である。前胸壁上0° の観測点 P の周りに描かれた半径1の円の一部に2次元の立 体角(Ω)が示されている。

JPN. J. ELECTROCARDIOLOGY Vol. 31 No. 1 2011



図 12B 陳旧性貫壁性心筋梗塞広がりが前胸壁の 立体角分布に及ぼす影響 図12Aのモデルを用いて,梗塞巣の広がり(2θ) を 30°,40°,60°,100°と変えたときに,梗塞 境界面が前胸壁上の各観測点(グラフの横軸)に 張る立体角(グラフの縦軸)を求めた.各々の立 体角分布曲線には,梗塞境界面の前胸壁上の目 印(B1,B2,B3)が示されている.このグラフ では,梗塞巣の広がり(2θ)が100°のときの梗 塞境界面が前胸壁 0°の観測点に対して張る立 体角(34°)で最大1mVの梗塞Q波に相当する立体角 (34°)のレベルを水平破線で示した.

壁上の位置を水平破線との交点から求めると、2*θ*が30°,40°,60°,100°の場合、各々54°,59°,64°, 72°となり、梗塞巣の大きさが増すほど0.1 mV以上のQ波が記録される前胸壁上の範囲が広がること が予測される.

また、心電図講義Ⅲ (p.420、図 12)³⁾で説明したように、立体角理論を応用すると、陳旧性心筋梗塞 の心電図異常 Q波の幅(秒)は、心内膜側から測った梗塞巣の厚さに比例し、異常 Q波の深さ(mV)は、 心内膜面での梗塞巣の広がりに比例することになる.したがって、異常 Q波の幅と深さの積(異常 Q波 と基線に囲まれた面積)は、梗塞巣の大きさ(体積)を反映すると考えられる.

陳旧性心筋梗塞患者より記録される異常Q波については、従来から、その幅と深さが心筋梗塞の大きさを反映するとともに、左室駆出率や梗塞後生存率に影響を与えると考えられてきたが^{7)~10}、立体角理論からもそのような心電図波形評価の妥当性が支持される.

7. 立体角理論で予測されること

a) 貫壁性心筋虚血

・貫壁性心筋虚血を作成したブタの心外膜面上で観察される心電図学的な虚血境界(ST上昇からST 下降に移行する位置)は、立体角理論から予測される虚血境界と正確に一致しており、肉眼的に識 別できる虚血境界の約2mm外側に位置する.

- ・立体角理論からは,前胸壁上の心電図学的な虚血境界(ST上昇からST下降に移行する位置)は解 剖学的な虚血境界の真上の位置よりもはるかに外側に位置すると予測される.
- ・貫壁性心筋虚血の真上の前胸壁では、虚血領域の広がり(両側境界面が左室中心点に作る角度2*θ*) が115°に達するまでは、虚血境界面の立体角(ST上昇電位に反映される)は増加する.したがっ て、前胸壁上で記録されるST上昇値は、虚血範囲が極端に広くない場合は、虚血領域の大きさに 比例する.
- ・貫壁性心筋虚血が大きくなると,前胸壁上でST上昇が記録される範囲が拡大する.ST上昇を示 す胸部誘導の数は,虚血の大きさを反映すると考えてよい.

b)心内膜下心筋虚血

- ・モデル解析では、心内膜下虚血の広がり(虚血境界の両端が左室中心点に作る角度2 θ)が152°に至るまでは、虚血境界面が真上の前胸壁に対して張る立体角は増大するため、ST下降の深さも増す. 心内膜下虚血の広がりが152°を越えると、境界面の起電力が相殺される現象(internal cancellation)が起こり、立体角の総和は減少し、ST下降の程度は減弱する.心内膜下虚血の範囲が左室の全周にまで広がると(2 θ = 360°)、虚血境界面は閉じた球となり、前胸壁の観測点がその外側に位置するため立体角は0となってST電位変化も消失することが予測される.
- ・心内膜下虚血が比較的小さい場合(2 *θ* < 152°)は,前胸壁上で観察される ST 下降の深さは虚血領 域の広さを反映する.
- ・心内膜下虚血の広がりが同じで厚さ(心内膜面から虚血境界面までの距離)が増しても、虚血境界面 が前胸壁の観測点に対して張る立体角は影響を受けないため、ST下降の深さも変化しない.
- ・心内膜下虚血の広がりが大きくなると、ST下降が記録される前胸壁の範囲が増大する.ST下降を 示す胸壁誘導の数は心内膜下虚血の広がりを反映すると考えてよい.
- ・立体角理論からは、心内膜下虚血の上に位置する胸壁ではST下降が記録されるが、その外側ではST上昇が生ずることが予測される。したがって、顕著なST下降を示す胸壁誘導に隣接してST上昇を示す胸壁誘導があっても、必ずしも心内膜下虚血にST上昇型虚血が併発したと考える必要はない。

c) 陳旧性心筋梗塞

- ・陳旧性心筋梗塞の広がり(梗塞巣の境界面が左室中心点に作る角度2*θ*)が増すと,135°までの範囲 内では,梗塞境界面が真上の胸壁上観測点に対して張る立体角は増大するため,梗塞Q波も深く なる.また,梗塞巣の厚さが増すにつれて,梗塞Q波の幅が広くなる.
- ・梗塞巣の境界より真上に伸ばした直線が前胸壁面と交わる点を梗塞境界の目印(B2)とすると、それは心電図学的な梗塞境界点(梗塞Q波が消失する位置)よりもはるかに内側に位置している.
- ・梗塞巣の広がりが大きくなるにつれて,異常Q波が記録される胸壁の範囲が広がる.異常Q波が 記録される胸部誘導の数は,梗塞巣の大きさを反映すると考えてよい.

8. おわりに

これまでの4回の講義では、心筋虚血や梗塞に伴う心電図 ST-T 波、QRS 波の変化や、それらの体表 面上の分布について、立体角理論を応用したモデル解析を中心に考察を進めてきた、次回は、心筋梗塞 に伴う心電図波形の経時的変化に焦点をあてる.

〔文献〕

- 1)秋山俊雄:心電図講義第1回:心筋梗塞と虚血の心電図. I.立体角理論. 心電図, 2010;30:247~255
- 2)秋山俊雄:心電図講義第2回:心筋梗塞と虚血の心電図. Ⅱ.立体角理論とST-T波異常. 心電図, 2010;30:312~326
- 3)秋山俊雄:心電図講義第3回:心筋梗塞と虚血の心電図.Ⅲ.立体角理論とQRS波形異常.心電図,2010;30:411~424
- 4) Richeson JF, Akiyama T, Schenk E : A solid angle analysis of the epicardial ischemic TQ-ST deflection in the pig. A theoretical and experimental study. Circ Res, 1978 ; 43 : 879 ~ 888
- 5) Holland RP, Brooks H : Precordial and epicardial surface potentials during Myocardial ischemia in the pig. A theoretical and experimental analysis of the TQ and ST segments. Circ Res, 1975 ; 37 : 471 ~ 480
- 6) Holland RP, Brooks H, Lidl B: Spatial and nonspatial influences on the TG-ST segment deflection of ischemia. Theoretical and experimental analysis in the pig. J Clin Invest, 1977; 60: 197 ~ 214
- 7) Wagner GS, Freye CJ, Palmeri ST, Roark SF, Stack NC, Ideker RE, Harrell FE Jr, Selvester RH : Evaluation of a QRS scoring system for estimating myocardial infarct size. I. Specificity and observer agreement. Circulation, 1982 ; 65 : 342 ~ 347
- 8) Prineas RJ, Crow RS, Blackburn H : The Minnesota Code Manual of Electrocardiographic Findings, John Wright, Littleton, MA, 1982
- 9) Watanabe Y, Wang J, Kondo T, Tokuda M, Chikamatsu H, Yasui T, Yamaguchi T, Kinoshita M, Kamide S, Nagai N, Abo Y, Yokoi H, Hishida H : Vectorcardiographic evaluation of myocardial infarct size: departure parameters are superior to conventional spatial parameters. Jpn Circ J, 1998; 62: 473 ~ 478
- 10) Tjandrawidjaja MC, Fu Y, Westerhout CM, Wagner GS, Granger CB, Armstrong PW ; APEX-AMI Investigators : Usefulness of the QRS score as a strong prognostic marker in patients discharged after undergoing primary percutaneous coronary intervention for ST-segment elevation myocardial infarction. Am J Cardiol, 2010 ; 106 : 630 ~ 634